

大学物理学

第三册

(美) F·W·SEARS 等著
恽 瑛 等译

人民教育出版社

大学物理学

第三册

[美] F. W. Sears 等著
恽 瑛 等译

人民教育出版社

内 容 提 要

本书根据美国 Addison-Wesley Publishing Company 出版的 F. W. Sears, M. W. Zemansky 和 H. D. Young 合著《大学物理学》(University Physics) 1976 年第五版 1978 年第四次印刷本译出。译本分四册出版，第一册为力学，第二册为热学和声学，第三册为电磁学，第四册为光学和原子物理学。

本书可作理工科大学物理教学参考书。

本册由南京工学院恽瑛(译 24、25、27--31、34、37 共九章)和黄福元(译 26、32、33、35、36 共五章)翻译，译稿经上海铁道学院朱培豫校订。

本书责任编辑：汤发宇。

高等学校教学参考书

大学物理学

第三册

[美] F. W. Sears 等著

恽 瑛等译

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 12.875 字数 311,000

1979年7月第1版 1979年12月第1次印刷

印数 00,001—200,000

书号 13012·0356 定价 0.93 元

第三册 目录

电 磁 学

第二十四章 库仑定律1	26-8 电子伏特.....72
24-1 电荷.....1	26-9 阴极射线示波器.....74
24-2 原子结构.....2	26-10 导体电荷的分配.....78
24-3 箔验电器和静电计.....5	26-11 范德格喇夫起电机.....80
24-4 导体和绝缘体.....6	习题.....81
24-5 感应起电.....7	第二十七章 电容 电介质
24-6 库仑定律.....9	的性质88
24-7 电相互作用.....14	27-1 电容器.....88
习题.....14	27-2 平行板电容器.....88
第二十五章 电场 高斯定	27-3 电容器的串联和并联.....92
律18	27-4 带电电容器的能量.....95
25-1 电场.....18	27-5 电介质的效应.....97
25-2 电场强度的计算.....23	27-6 电介质感生电荷的分子
25-3 电力线.....32	理论.....103
25-4 高斯定律.....34	27-7 电极化强度和电位移...106
25-5 高斯定律的应用.....40	习题.....109
习题.....50	第二十八章 电流 电阻
第二十六章 电位55	电动势115
26-1 电位能.....55	28-1 电流.....115
26-2 电场的线积分.....58	28-2 电阻率.....118
26-3 电位.....60	28-3 金属导电的理论.....122
26-4 电位差的计算.....63	28-4 电阻.....123
26-5 等位面.....67	28-5 电动势.....126
26-6 电位梯度.....69	28-6 电流与电压的关系.....136
26-7 密立根油滴实验.....70	28-7 电路中的功和功率.....138

28-8	温差电	143
28-9	地球的电场	148
28-10	电流的生理效应	149
	习题	151

第二十九章 直流电路及仪

	表	157
29-1	电阻的串联和并联	157
29-2	基尔霍夫定则	161
29-3	安培计和伏特计	164
29-4	惠斯登电桥	168
29-5	欧姆计	170
29-6	电位计	170
29-7	RC串联电路	171
29-8	位移电流	175
	习题	177

第三十章 磁场

30-1	磁性	187
30-2	磁场	188
30-3	磁感应线 磁通量	192
30-4	带电粒子在磁场中的运动	194
30-5	汤姆孙的 e/m 测量	197
30-6	同位素	200
30-7	质谱学	204
30-8	回旋加速器	206
	习题	209

第三十一章 作用在载流导

	体上的磁力	214
31-1	作用在载流导体上的力	214
31-2	霍耳效应	215

31-3	闭合回路所受的力和转矩	217
31-4	电流计	221
31-5	支圈式电流计	223
31-6	冲击电流计	224
31-7	直流电动机	225
31-8	电磁泵	227
	习题	228

第三十二章 电流的磁场

32-1	运动电荷的磁场	232
32-2	电流元的磁场 毕奥定律	234
32-3	长直导体的磁场	236
32-4	平行导体间的力 安培和库仑	238
32-5	载流圆线圈的磁场	240
32-6	安培定律	243
32-7	安培定律的应用	245
32-8	磁场和位移电流	250
	习题	252

第三十三章 感生电动势

33-1	动生电动势	257
33-2	法拉第定律	262
33-3	探察线圈	267
33-4	电流计的阻尼	268
33-5	感生电场	270
33-6	楞次定律	272
33-7	电子感应加速器	273
33-8	涡流	276
	习题	278

第三十四章 电感

34-1	互感	286
------	----	-----

34-2	自感	288	36-3	RLC 串联电路	342
34-3	电感器中的能量	290	36-4	平均值和方均根值 交 流仪表	346
34-4	RL 电路	291	36-5	交流电路的功率	349
34-5	LC 电路	295	36-6	串联谐振	352
34-6	RLC 电路	298	36-7	并联电路	354
	习题	300	36-8	变压器	355
第三十五章 物质的磁性		304		习题	358
35-1	磁性材料	304	第三十七章 电磁波		363
35-2	磁导率	305	37-1	引言	363
35-3	磁性的分子理论	307	37-2	电磁波的速率	365
35-4	磁化强度和磁场强度	309	37-3	电磁波的能量	368
35-5	磁化率和磁导率	312	37-4	物质中的电磁波	372
35-6	铁磁性	314	37-5	正弦电磁波	373
35-7	磁畴	317	37-6	天线的辐射	376
35-8	磁滞	320	37-7	传输线上的电磁波	378
35-9	自感	322		习题	380
35-10	永久磁铁	323	单数习题答案		383
35-11	地球的磁场	326	索引		389
35-12	磁路	328	国际单位制		
	习题	332	物理恒量		
第三十六章 交流电		336	单位换算因子		
36-1	引言	336			
36-2	包含电阻、电感或电容 的电路	337			

第二十四章 库仑定律

24-1 电 荷

早在公元前 600 年，古希腊人就知道琥珀与毛织物摩擦后具有吸引轻物的性质。现今描述这种性质时，称琥珀起电或带电。起电、带电这些名词都来自希腊字“*elektron*”，意思就是琥珀。任何固体材料同任何其他材料相摩擦，就可带电。因此，汽车由于在空气中行驶，就会带电；纸张通过印刷机运动时，在纸上就出现电荷；用梳子梳干燥的头发时，梳子就会带电。实际上，只要物体间有紧密的接触，就能产生电荷。摩擦只不过使面与面之间许多点发生良好的接触罢了。

在演示中，常用硬橡胶棒与毛皮。如果把橡胶棒与毛皮摩擦后，放在一个盛有薄纸屑的碟子里，开始时将有許多纸屑附在棒上，但是数秒钟后，纸屑就飞离了。开始时橡胶棒吸引纸屑的现象将在第二十七章里解释；接着发生的排斥现象，是由于有一种力存在，两个物体只要是用相同方法起电，它们之间就会出现这种力。设有两个小而轻的木髓球，各用细丝线相互靠近地悬挂着。起先，两球被一根带电的橡胶棒所吸引并附着在棒上；稍待片刻，两球就被橡胶棒所排斥，同时也相互排斥。

用一根被丝绸摩擦过的玻璃棒做同样的实验，得到同样的结果；两个木髓球和这样一根玻璃棒接触后就带电了，它们不仅被玻璃棒所排斥，也相互排斥。可是，当一个木髓球与带电的橡胶棒接触后，再与另一个曾和带电的玻璃棒接触的木髓球靠近时，这两个木髓球却是互相吸引的。因此，我们得到结论：电荷有两类——

与毛皮摩擦过的橡胶棒所带有的电荷称为负电荷，与丝绸摩擦过的玻璃棒所带有的电荷称为正电荷。上面所描述的木髓球实验导致基本的结论是：(1)同类电荷相排斥，(2)异类电荷相吸引。

这种电的斥力或引力和万有引力不同，并且在许多我们将要讨论到的场合，电的斥力或引力比万有引力大得多，因此后者可以完全忽略不计。

电荷之间除了引力和斥力以外，还有因电荷相对运动而产生的力。磁现象就是由这种力引起的。许多年来，用来解释两根条形磁铁之间的斥力或引力的理论，认为存在一种与电荷相似的磁性实体，称为“磁极”。可是，众所周知，在载有电流的导线周围也观察到磁效应。电流只不过是电荷的运动，现在我们知道，各种磁效应都来源于电荷的相对运动。所以磁和电不是两个毫无关联的问题，而是由电荷性质所引起的互相联系着的两种现象。

假设一根橡胶棒与毛皮摩擦后，再与一个悬挂着的木髓球相接触。这时，橡胶棒和木髓球两者都带有负电荷。然后再将毛皮移近这个木髓球，那么球就被吸引住了，这显示出毛皮带有正电荷。由此可见，橡胶与毛皮摩擦时，在这两种物质上就出现相反的电荷。任何物质与任何其他物质相互摩擦时，都发现有上面这种现象。例如，玻璃与丝绸摩擦时，玻璃带正电，而丝绸带负电。这种现象有力地表明：不能产生或创造电荷，而得到电荷的过程只是由于某种东西从一个物体转移到另一个物体，致使一个物体的某种东西过剩，而另一个物体却缺少这种东西。直到十九世纪末叶才发现所谓“某种东西”是十分细小而轻质的负电粒子，现今称之为电子。

24-2 原子结构

原子一词来源于希腊字“atomos”，表示不可分的意思。不用

说，这个名词现在已经不适当。所有的原子都是亚原子粒子不同程度的复杂组合。我们已有许多方法可将一些粒子个别地或成群地从原子里分裂出来。

组成原子的亚原子粒子有三类：带负电荷的电子，带正电荷的质子，以及中性的中子。电子的负电荷与质子的正电荷是等量的，且从未发现比这两种电荷还小的电荷。所以，一个质子或一个电子的电荷量是电荷的最小的自然单位。

在各种元素的原子中，亚原子粒子都以同样的一般规律排列。质子和中子总是组成紧密、结实的一团，称为原子核。由于质子的关系，核的净电荷是正的。如把原子核粗略地看作球形，则它的直径的数量级为 10^{-14} m。在原子核的外面，离核相当远的地方有电子，电子的数目等于原子核内质子的数目。如果原子没有受到干扰，没有电子从原子核周围的空间移出，则整个原子呈电中性。也就是说，原子核的正电荷与电子的负电荷相加为零，正如相等的正数与负数相加为零一样。如果移去一个或多个电子，剩下来带正电荷的结构就称为正离子。获得一个或多个额外电子的原子称为负离子。失去或得到电子的过程称为电离。

丹麦物理学家玻尔，在 1913 年提出的原子模型中，电子描绘成在圆形或椭圆形轨道上绕原子核回转。近代研究指出，电子应更精确地描绘成扩展的电荷分布，这将在第四十四章中用量子力学的原理来讨论。然而，玻尔模型仍有利于使原子结构形象化。玻尔模型所认为的电子轨道，实为电子电荷的分布，其直径决定整个原子的大小，其数量级为 2 或 3×10^{-10} m，即约为原子核直径的一万倍。玻尔的原子模型是太阳系的缩影，不过以电力替代万有引力。在中心的带正电荷的原子核相当于太阳；电子由于原子核的电力吸引而绕核运动，相当于诸行星在万有引力作用下绕太阳运动。

质子和中子的质量几乎相等，各约等于电子质量的1840倍。因此，一个原子的质量几乎全部集中在原子核内。因为1千摩尔的单原子氢含有 6.02×10^{26} （阿佛伽德罗数）个粒子，其质量为1.008 kg，所以，单个氢原子的质量为

$$\frac{1.008 \text{ kg}}{6.02 \times 10^{26}} = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

所有的原子都由三类亚原子粒子组成，而氢原子却是这规律的唯一例外。氢原子的核是一个质子，核外有一个电子。所以氢原子的总质量中， $\frac{1}{1840}$ 是电子的质量，其余就是质子的质量。取三位有效数字，

$$\text{电子的质量} = \frac{1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}}{1840}$$

$$= 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\text{质子的质量} = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

因为质子和中子的质量几乎相等，所以

$$\text{中子的质量} = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

在氢元素之后，氦的原子结构最简单。氦原子核由两个质子和两个中子组成，并有两个核外的电子。失去这两个电子，就是氦核，即带有两个正电荷的氦离子，常常叫做 α 粒子。氦后面是元素锂，它的原子核中有三个质子，因此就有三个单位的核电荷。在未电离状态下，锂原子有三个核外的电子。每一种元素的原子核的质子数是不同的，所以就有不同的正核电荷。在本书的末尾列有元素表，就是众所周知的周期表，表中每一种元素占一个方格，格内有一数，叫做原子序数。

原子序数表示原子核内质子的数目，也是在未被干扰的状态下核外的电子数。

每一种材料的物体含有大量的带电粒子，包括原子核内带正电的质子和核外带负电的电子。当质子的总数等于电子的总数时，这个物体就整体来说是电中性的。

对中性的物体加入一些负电荷，或移出一些正电荷都可使这个物体有过剩的负电荷。同样，加入正电荷或移出负电荷，都将导致过剩的正电荷。在多数场合中，是把负电荷(电子)加入或移出，而“带正电的物体”就是失去一些正常电子含量的物体。

一个物体所带的“电荷”，指的只是它的过剩电荷。过剩电荷总是占物体全部正的或负的电荷中很小的一部分。

24-3 箔验电器和静电计

一个带电的木髓球可当作一个检验物体，去确定另一个物体是否带电。箔验电器提供了更灵敏的电荷检验(图 24-1)。它的结构是：一根金属杆 B 穿过用橡胶、琥珀或硫磺制成的支柱 C ，在 B 的末端，夹着两片薄的金箔或铝箔 A ；外壳 D 上装有玻璃窗，通过窗子可以观察到箔片，同时也可用以防止气流吹动箔片。当一个带电体与验电器顶端金属圆球接触时，两箔片就得到同类的电荷而相互排斥，箔片上的电荷可由金箔张开的程度来量度。

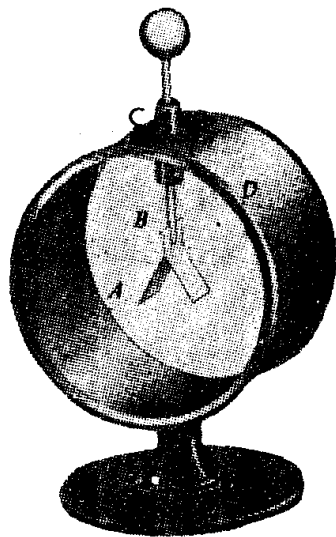


图 24-1 箔验电器。

如把电位差为几百伏的电池组的一端，接到验电器的圆球上，另一端接到验电器的外壳上，两箔片也能张开，恰如与带电体接触使箔片得到电荷的情形相同。用这两种方法，使箔片得到电荷的“种类”是没有区别的。一般说来，

“静电”和“电流的电”是无差别的。“电流”一词是指电荷的流动，而“静电学”一词，则主要涉及静止电荷之间的相互作用。在上述的任一种情况下，电荷就是电子或质子的电荷。

依靠近代电子学已制出静电计，这种仪器应用了电子放大器，在测量电荷时比用简单的箔验电器有较大的灵敏度，并可对电荷的数量作精确的定量测量。

24-4 导体和绝缘体

将铜线的一端接到验电器的顶端圆球上，另一端支撑在玻璃杆上，如图 24-2 所示。然后将一根带电的橡胶棒与铜线的外端接触，则验电器的箔片立即张开。

由此可知，有电荷沿着铜线转移，我们称铜线为导体。如果我们用丝线或橡皮带替代铜线，重复上述实验，验电器的箔片就不张开，我们称丝线或橡皮带为绝缘体或电介质。电荷在物质中的运动情

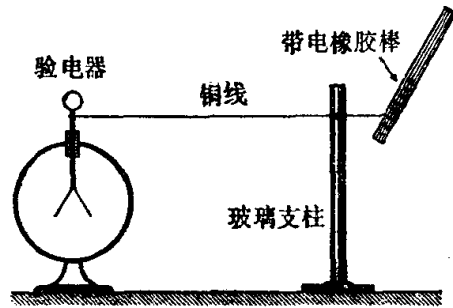


图 24-2 铜是导体。

况将在第二十八章详细讨论，但是按照当前的要求，只要说出大多数物质属于上述两种之一就够了。导体能让电荷通过，绝缘体则不能。

一般来说，金属是良导体，非金属是绝缘体。金属具有正的原子价，在溶液中能形成正离子，它表明金属原子容易放弃一个或一个以上外层电子。在金属导体内，如铜线之类，少数外层电子与所属原子脱离，并在该金属中自由运动，正如气体分子可以在容器里的沙粒空隙间自由运动一样。这些自由电子常常叫做“电子气”。那些带正电的原子核和其余的电子，则仍然固定在它们原来的位置。另一方面，在绝缘体内就没有自由电子或最多只有极少数的

自由电子。

接触起电的现象，并不限于橡胶和毛皮，也不限于一般绝缘体。任何两种不同的物质相互接触时，都能程度不同地表现这种现象。但是如果用导体表演接触起电时，必须在导体上装有绝缘柄，否则导体获得的电荷将会立刻漏掉。

24-5 感应起电

倘若用一根曾与毛皮摩擦过的橡胶棒同箔验电器接触，使验电器带电，橡胶棒上部分额外的电子就转移到验电器上，在橡胶棒上减少了负电荷。还有另外一种方法用这橡胶棒使其他物体带电，橡胶棒不失去自己的电荷，而可使其他物体带异号电荷。这种方法，称为感应起电，如图 24-3 所示。

在图 24-3(a)中，装在绝缘支架上的两个中性金属球，彼此接触。如图(b)所示，如果用一根带负电的橡胶棒靠近一个金属球，但不与之接触，金属球中的自由电子就被推斥，在离开橡胶棒的方向向右漂移。由于这些电子不能从金属球中逃逸，在右球的右表面就有过剩的负电荷聚集。这就使得左球的左表面少了一些负电荷，即有了过剩的正电荷。这种过剩的电荷称为感生电荷。

不要误认为两金属球内所有自由电子都被驱向右球的右表面。感生电荷一旦产生，立即对两球内的自由电子有力的作用。在上述情况下，这力是指向左方的(负的感生电荷产生斥力，正的感生电荷产生吸力)。在极短的时间内，整个系统达到平衡状态。即在两球内部的每一点处，带电棒作用在电子上的指向右方的力，恰与感生电荷作用在电子上的指向左方的力相互平衡。

橡胶棒靠近金属球有多久，金属球表面上感生电荷就存留多久。移去棒后，球内的电子云即向左移动，因而又恢复原来的中性状态。

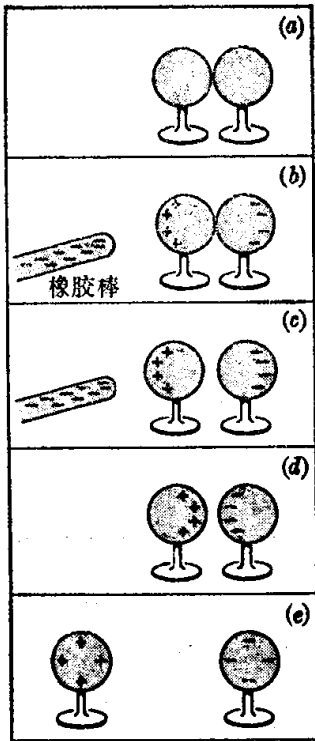


图 24-3 感应起电使两个金属球带异号电。

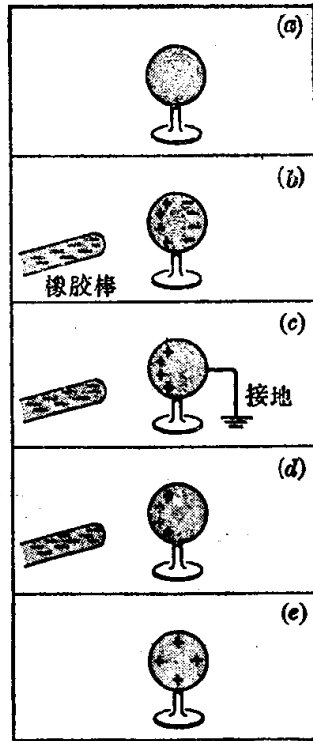


图 24-4 感应起电使单个金属球带电。

当橡胶棒仍然靠近时，将两个球稍稍分开，如图 24-3(c) 所示。然后再将棒移去，如图 24-3(d) 所示，两个金属球带有反号电荷，相互吸引。如果再将两个球分开得远些，如图 24-3(e) 所示，电荷就会均匀分布在两个球上。注意，从(a)到(e)各步骤中，带负电荷的橡胶棒没有丢失一点电荷。

图 24-4 中从(a)到(e)各步是显而易见的。图中表示用感应起电法使装在绝缘支座上的单个金属球带电。图(c)中的接地符号表示球接地（地球是导体）。大地就取代了图 24-3 中的第二个金属球。步骤(c)表示：电子受到排斥，或经过导线入地，或当有人用手指与球相触，电子沿着潮湿的皮肤入地。于是，大地得到了负电荷，其电量与留在金属球上的正电荷相等。

如果球内可移动的电荷是正的，发生在图 24-3 和 24-4 的过程，可同样得到解释。如果正负电荷都是可移动的，也一样得到解释。虽然我们现在知道，在金属导体内移动的是负电荷，但为方便起见，往往把一个过程描述成正电荷的移动。

24-6 库仑定律

关于带电体之间作用力的定律，库仑(C. A. Coulomb, 1736—1806)在 1784 年首先作了定量的研究，他利用扭秤测量带电体之间的作用力。在十三年后，卡文迪许(Cavendish)也利用这种扭秤测量万有引力。库仑得知两个“点电荷”之间的引力或斥力与点电荷之间距离的平方成反比，而所谓“点电荷”是指带电物体的线度远小于它们之间的距离 r 。

电荷之间的作用力也与每个带电体上的电量有关。一个物体所带净电荷的量，可以用在这个物体内的过剩电子数或过剩质子数来表示。但实际上，在表示一个物体所带的电荷时，我们所用的单位，远远大于单一电子的电荷或单一质子电荷。我们用字母 q 或 Q 来表示一个物体的电量，关于电荷单位的定义，留待以后说明。

在库仑的时代，电荷的单位尚无规定，也没有方法去量度某一给定的电荷。尽管如此，库仑却设计了很巧妙的方法，来说明带电体所受的作用力、或带电体所作用的力与它所带电荷有何关系。他推论如下：若将一个带电的导体球与另一个完全相同但不带电的导体球相接触，由于对称性，第一个带电球体上的电荷就要均分在这两个导体球上。于是就有方法得到任何给定电荷的二分之一、四分之一等等。他的实验结果与下面的结论相符：两个点电荷之间的作用力与它们的电荷量 q 和 q' 的乘积成正比。于是，两个点电荷之间作用力的大小可完整地用下式表示

$$F = k \frac{qq'}{r^2} \quad (24-1)$$

式中 k 是比例常数, 它的大小决定于 F 、 q 、 q' 和 r 的单位. 式 (24-1) 是库仑定律的数学表式. 库仑定律的文字表述如下: 两点电荷之间的引力或斥力, 与两点电荷所带电量的乘积成正比, 而与点电荷之间的距离平方成反比.

库仑定律的最好验证, 在于从它得出的许多结论的正确性, 而不是用点电荷直接做实验来验证它, 因为这种实验很难得到精确结果.

作用在每个带电粒子上的力总是沿两个粒子的连线. 电荷量 q 和 q' 是代数量, 可正可负, 相当于有两种电荷存在, 即所谓正电荷和负电荷. 式 (24-1) 给出任何情况下两点电荷间相互作用力的大小; F 为正值时, 相当于同号电荷间的斥力; F 为负值时, 相当于异号电荷间的引力. 在任何一种情况下的力都遵守牛顿第三定律: 电荷 q 作用在 q' 上的力与 q' 作用在 q 上的力大小相等、方向相反.

库仑定律和牛顿万有引力定律具有类似形式

$$F = G \frac{mm'}{r^2}$$

库仑定律中的电常数 k , 对应于万有引力定律中的引力常数 G .

当两电荷间的空间存在物质时; 由于介质分子中的电荷发生重新分布, 作用在每一电荷上的净作用力就会改变. 这种效应, 以后讨论. 实际上, 库仑定律可用于空气中的点电荷, 因为即使在大气压下, 空气的影响也不过使作用力的大小偏离其真空中数值的二千分之一左右.

本书各章, 凡涉及电现象, 我们全部采用 mks 单位制. mks

电单位包括所有常用的电单位,如伏特、安培、欧姆和瓦特等。cgs 单位制也是常用的,在科学工作中用得较多,在工商业中用得较少。但是却没有英制的电单位。这也是放弃英制而普遍采用米制的许多理由之一。而且毫无疑问, mks 单位制最终将为全世界所采用。

mks 单位制中的三个基本单位(米、千克、秒)之外,我们现在必须加上第四个、即电荷的单位。这个单位叫做一库仑(1C),所以单位制的全名应为 mksc 单位制^①。在这种单位制中,电常数 k 为

$$k = 8.98755 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

$$\approx 9 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$$

以后,联系到电磁辐射的研究,我们将指出 k 与真空中光速 c 是密切相关的,

$$c = 2.998 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

显然,

$$k = 10^{-7} c^2$$

当然这个关系不是偶然的,而是来自电流单位的定义,并且和电场与磁场的相互作用有关,以后要讨论。

在本书不用的 cgs 静电单位制中,规定常数 k 为 1,且没有单位。这种单位制所规定的电荷单位,叫做静库仑,或称 esu (静电系单位)。其转换因子为

$$1 \text{esu} = 2.998 \times 10^9 \text{C}$$

电荷的“自然”单位 e 为一个电子或质子所带的电荷。到目前

^① 以后可知库仑定义为:当电路中通过的电流为 1 安培(1 A)时,在 1 秒(1 s)内通过电路某一点的电量即为 1 库仑。所以,这种单位制也叫 mksa 单位制。